

# 不同栽培模式旱作春玉米农田土壤水分 时空动态和产量效应

白翔斌<sup>1,2</sup> 岳善超<sup>1</sup> 李世清<sup>1</sup> 陈迎迎<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 于2012年和2013年连续两年进行田间定位试验, 研究在全膜双垄沟覆盖条件下不同施肥和开花期揭膜处理对春玉米农田土壤水分时空变化特征、土壤含水量和水分利用效率的影响。试验设农户模式(施N 200 kg·hm<sup>-2</sup>, 半膜, CK)、高产栽培(施N 380 kg·hm<sup>-2</sup>, T1)、高产高效栽培(施N 225 kg·hm<sup>-2</sup> + 有机肥, T2)、再高产高效栽培(施N 225 kg·hm<sup>-2</sup> + 有机肥 + 开花期揭膜, T3)等4个处理, 以先玉335为供试玉米品种, 分别在玉米各个关键生育期测定土壤含水量, 收获测定实际产量。结果表明, T2、T3处理在生育前期、中期不仅能够高效利用浅层(0~100 cm)土壤水分, 而且有利于促使深层(100~200 cm)土壤水分向上迁移, 为玉米生育后期雨季充分蓄纳降雨腾出库容; 从播前到收获0~200 cm土壤贮水量均降低, 收获时各处理贮水量依次为CK > T1 > T2 > T3, 差值均小于5 cm, 没有显著差异。土壤含水量在0~60 cm土层变化幅度大, 而深层(160~200 cm)比较稳定。四种处理间耗水量、产量和水分利用效率存在不同差异, 表现为T3 > T2 > T1 > CK。尤其2013年四个处理产量和水分利用效率均达到显著水平, T1、T2、T3产量分别比CK高27.4%、34.8%、42.4%, CK处理水分利用效率比T1、T2、T3分别低21.7%、29.9%、23.7%。高产高效栽培, 特别是开花期揭膜的再高产高效栽培模式, 在玉米整个生育期不仅没有导致土壤剖面土壤水分显著降低, 而且可显著提高籽粒产量和水分利用效率, 是该地区值得推广的旱作春玉米栽培模式。

**关键词:** 春玉米; 土壤含水量; 栽培模式; 水分利用效率; 产量

**中图分类号:** S152.7; S513.506 **文献标志码:** A

## Effects of various cultivation systems on soil water space-time dynamics and yield of rainfed spring maize

BAI Xiang-bin<sup>1,2</sup>, YUE Shan-chao<sup>1</sup>, LI Shi-qing<sup>1</sup>, CHEN Ying-ying<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To assess the impacts of different cultivation systems on the characteristics of space-time dynamics on soil moisture and water use efficiency (WUE), which could be helpful for increasing grain yield and WUE in dryland maize production in semi-arid regions, a field trial was conducted at the Changwu experimental station in 2012 and 2013. Four treatments were carried out including farmers' practice (N 200 kg·hm<sup>-2</sup>, ridges covered with plastic film, CK), T1 treatment (N 380 kg·hm<sup>-2</sup>, ridges and furrows both covered with plastic film), T2 treatment (N 225 kg·hm<sup>-2</sup> + Organic fertilizer, ridges and furrows both covered with plastic film), T3 treatment (N 225 kg·hm<sup>-2</sup> + Organic fertilizer, ridges and furrows both covered with plastic film and removing plastic film at silking stage). Compared to farmers' practice, T1, T2 and T3 treatments could not only efficiently use water in the 0~100 cm soil layers, but also use water in the 100~200 cm soil layers. At harvest, no significant differences in soil water content were observed between treatments. Water consumption levels during the whole growing stage of the four treatments were in the order of T3 > T2 > T1 > CK, and the grain yields followed the same. Because the rate of yield increase was higher than that of water consumption, the water use efficiencies of the four treatments were also found to be in the same order as T3 > T2 > T1 > CK. In conclusion, the cultivation systems that ridges

收稿日期: 2014-04-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2009CB118604); 公益性行业科研专项(200803030, 201103003); 国家自然科学基金(31270553)

作者简介: 白翔斌(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事旱地农田水分平衡研究。E-mail: baixb130115yy@163.com。

通信作者: 李世清(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤-植物氮素营养, 旱作春玉米高产及水氮高效利用研究工作。

E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn。

and furrows both were covered with plastic film improved not only grain yield but also water use efficiency, especially in the plots where plastic film was removed at the silking stage. This cultivation system could be helpful for increasing grain yield and WUE of dryland maize in semi-arid regions.

**Keywords:** spring maize; soil water content; WUE; yield; cultivation system

黄土高原旱作农田地下水埋藏较深,一般不直接参与土壤-植物-大气(SPAC)水分循环,农田水分资源只有降水和土壤水两部分<sup>[1]</sup>。在降水稀少、季节分布不均和供需错位等自然条件影响下,土壤水分就成为影响旱作农田作物产量的主要因素<sup>[2-4]</sup>。农田栽培方式的改变对降水资源的高效利用和作物产量的提高具有现实意义<sup>[5-9]</sup>。

渭北旱塬降水时空分布不均匀且变率大,田间蒸散量大,造成田间水分亏缺。这些地区不仅降水量少,而且降水的时间分布与作物的生长需水期相错位,导致作物产量低且不稳,已成为当地农业发展的主要限制因素<sup>[10-11]</sup>。有研究表明运用地面覆盖方法可以减少土壤无效蒸发,提高降水入渗率,储蓄土壤水分,充分利用有限降水资源,对促进旱地作物高产具有重要现实意义,是发展农业生产的重要措施<sup>[12]</sup>。全膜双垄沟播栽培技术集覆盖抑蒸、膜面集雨、垄沟种植技术为一体,最大限度地储蓄自然降水;地面蒸发最低化,特别能使春季10 mm以下的降雨集中入渗于作物根部而被作物有效利用。该技术使地膜的抑制蒸发、雨水集流、贫水富集等作用得到综合发挥,显著提高了作物产量和水分利用效率<sup>[13-15]</sup>。近几年,在甘肃东部旱作区大面积推广应用的玉米全膜双垄沟播技术,采用全地面地膜覆盖沟垄种植的方式,垄面作为集水区,玉米种植在沟内,具有增温、聚水和保墒的作用,使玉米等作物增产30%以上<sup>[15]</sup>。目前对不同覆膜方式下水温、产量效应方面的研究已有一些报道<sup>[16-18]</sup>,且多以一年数据分析居多,比较单一,结果也是参差不齐,而对

于全膜双垄沟播技术不同施肥和开花期揭膜状况下土壤水分动态、增产机制及其水分利用效率的研究尚鲜见系统报道。本文通过连续两年定位试验探讨全膜双垄沟播条件下不同施肥和揭膜处理对春玉米全生育期田间土壤水分时空动态、水分利用效率和耗水规律的影响,进一步探索提高水分利用效率的技术途径,揭示全膜双垄沟播技术的增产机理,期为旱地春玉米节水高产提供技术参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验在中国科学院长武农业生态试验站进行。试验站位于黄土高原中南部陕甘交界处陕西省长武县洪家镇王东村,北纬 $35^{\circ}12'$ ,东经 $107^{\circ}40'$ ,海拔1200 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水584 mm,年均气温 $9.1^{\circ}\text{C}$ ,无霜期171 d,地下水埋深50~80 m,属典型旱作农业区;农作物以一年一熟小麦、玉米为主。春玉米试验土壤为黑垆土,耕层有机质含量为 $11.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮 $0.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,矿质氮 $3.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效磷 $14.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效钾 $144.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

根据长武农业生态试验站气象资料统计(图1)2012年试验区年降水553.8 mm,比多年平均值(584 mm)低5.2%,玉米生育期降雨量为472 mm,季节分配不均,其中1、2、3、4、10、12月降水量不足年降水量的17.5%,5、6、11月降水量为年降水量的28.0%左右,7~9月为雨季,降水量占年降水量的55.0%。2013年试验区年降水609.8 mm,比多年

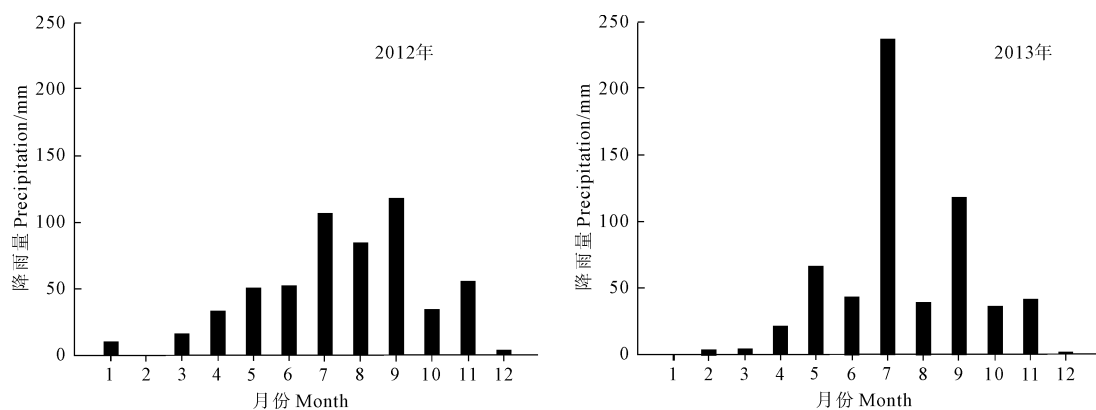


图1 试验期间试验区降水分布

Fig. 1 Distribution of precipitations during 2012—2013 in Changwu

平均值(584 mm)高 4.4%,玉米生育期降雨量为 558 mm,1、2、3、4、12 月降水量不足年降水量的 5.2%,5、6、8、10 月降水量不足年降水量的 30.0%,但均为几次集中的较大降雨,对作物生长有利,7、9 月为雨季,降水量占年降水量的 58.0%,且 7 月高达 38.9%,有效补充了土壤水分。

### 1.2 试验设计和方法

以春玉米先玉 335 为供试材料,于 2012 年和 2013 年连续两年进行田间试验,运用全膜双垄沟播技术,采用完全随机设计,试验设农户模式(品种为榆单 9 号,半膜覆盖,平作,等行距)为对照(200 kg·hm<sup>-2</sup> N,CK)、高产栽培(380 kg·hm<sup>-2</sup> N,T1)、高产高效栽培(225 kg·hm<sup>-2</sup> N+有机肥,T2)、再高产高效栽培(225 kg·hm<sup>-2</sup> N+有机肥+开花期揭膜,T3)共 4 个处理(有机肥等量),每个处理 3 次重复,采用宽窄行播种(60 cm/40 cm),小区面积 56 m<sup>2</sup>,种植密度 85 000 株·hm<sup>-2</sup>,其它 3 个处理都是周年覆膜。氮肥为尿素,分三次施入,播前施入基肥,拔节期和吐丝期分两次追肥,三次比例为 4:3:3,磷肥(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12% 的过磷酸钙,40 kg·hm<sup>-2</sup>)、钾肥(含 K<sub>2</sub>O 45% 的硫酸钾,80 kg·hm<sup>-2</sup>)和有机肥做基肥一次性施入。

分别在玉米各个关键生育期,即播前(PT)、六叶期(V6)、吐丝期(R1)、乳熟期(R3)和完熟期(R6)采取 0~200 cm 土样,分 10 个土层测定,步长为 20 cm,每个小区定点采样。采用烘干法测定土壤含水量。收获记产时,每个小区选取具有代表性的 10 m<sup>2</sup> 区域收获玉米穗并称量,再从中选取具有代表性的 10 棒玉米称重,将这 10 棒玉米带回实验室脱粒烘干,称籽粒重量及穗轴重量,按实收计算产量。

### 1.3 土壤含水量测定和方法

土壤贮水量  $SWS(mm) = WS \times b \times d$ ,其中  $WS$  为土壤含水量, $b$  为土壤容重( $g \cdot cm^{-3}$ ), $d$  为土壤厚度(mm)。

水分利用效率  $WUE = Y_d/ET$ ,其中  $Y_d$  为籽粒产量( $kg \cdot hm^{-2}$ ), $ET$  为玉米全生育期耗水量(mm)。

$ET = \Delta SWS + P$ ,其中  $\Delta SWS$  为播种时土壤贮水量与收获时土壤贮水量之差, $P$  为生育期降雨量。

### 1.4 数据处理和分析方法

应用 Microsoft Excel、SPSS 统计软件和 Sigma-plot 绘图软件进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同栽培模式春玉米农田土壤贮水量季节变化

不同栽培方式旱作春玉米农田两年土壤贮水量变化如表 1。两年春玉米田 0~200 cm 土层土壤贮

水量变化( $\Delta SWS$ )随着时间的延续呈现出“增—减—增”的变化规律,各处理间存在不同程度的差异,这与玉米生育期和当年降雨状况有密切关联。2012 年 PT~V6 时期(4 月 13 日—6 月 3 日)玉米处于苗期,耗水量小,四个处理 0~200 cm 土层土壤贮水量均缓慢增加, $\Delta SWS$  没有显著差异。V6~R1(6 月 3 日—7 月 11 日)为玉米营养生长阶段,气温迅速升高,田间尚未封垄且通风良好,根系对土壤水分的利用加强,蒸发蒸腾加强,且此时期降雨不多,所以 0~200 cm 土层土壤贮水量急剧下降,水分变化达到急变状态,T1、T2、T3 处理  $\Delta SWS$  分别为 108.5、120.9、130.2 mm,比 CK 处理(66.7 mm)分别低 41.8、54.2、63.6 mm,达到显著水平,同时在 0~100 cm 和 100~200 cm 也均有显著差异。T1、T2、T3 处理玉米对土壤水分的吸收首先主要体现在 0~100 cm 浅层土壤,随后玉米生长旺盛,耗水量大,由于全膜覆盖的提墒作用,使得 100~200 cm 深层土壤水分向上迁移,以供后期玉米充分灌浆、保墒增产;而 CK 处理施氮水平低,半膜平作提墒作用小,水氮协同效应弱,因而植株生长缓慢且矮小。R1~R6(7 月 11 日—9 月 19 日)为玉米生殖生长阶段,由于 7—9 月雨季大量降水(占年降水量的 55.0%),0~100 cm 土层土壤水分迅速增加。T3 处理由于揭膜使得雨季降水入渗效果好,前期和中期耗水腾出容库大,从而蓄纳更多降水,大幅度增加 0~100 cm 土层土壤贮水量,比 CK 处理  $\Delta SWS$  高 35.3 mm,差异显著。到收获期,四个处理之间 0~200 cm 土壤贮水量没有差异。

由于 4、5 月有 78.3 mm 的降雨,2013 年 PT~V6(4 月 7 日—6 月 2 日)阶段各处理 0~100 cm 土壤贮水量均增加。V6~R1(6 月 2 日—7 月 14 日)阶段,玉米快速生长,水分需求量大,0~200 cm 土层土壤贮水量迅速减少,T1、T2、T3 处理较 CK 处理  $\Delta SWS$  分别低 68.3、63.7、80.7 mm,差异显著,说明全膜双垄沟播耗水量远大于半膜平作。各处理 0~100 cm 土层  $\Delta SWS$  明显低于 100~200 cm 土层。R1~R6(7 月 14 日—9 月 16 日)时期,玉米经过吐丝期、乳熟期,耗水大,同时雨季 236 mm 强降雨,土壤贮水量补给充分,各处理 0~200 cm 土层土壤贮水量较播前高 30~55 mm,尤其 T3 处理开花期揭膜使降水入渗最大化,不但之前玉米耗水得到完全恢复,而且蓄纳了更多的水供后期生长。收获期 T1、T2、T3 和 CK 处理土壤贮水量分别为 462.5、463.0、459.4、465.91 mm,没有显著差异。

表 1 不同栽培方式旱作春玉米生长阶段不同土层土壤贮水量变化及完熟期 0~200 cm 土壤贮水量

Table 1 Dynamics of soil water storage in different soil layers and 0~200 cm soil water storage at the mature stage of rainfed spring maize under different cultivations

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	土壤贮水量变化 Soil water storage/mm							
		2012				2013			
		PT~V6	V6~R1	R1~R6	R6	PT~V6	V6~R1	R1~R6	R6
0~200	T1	10.5a	-108.5a	49.8ab	483.9a	19.5a	-101.8a	41.8ab	462.5a
	T2	12.3a	-120.9a	44.8ab	469.4a	22.5a	-97.2a	55.2a	463.0a
	T3	13.0a	-130.2a	71.0a	482.9a	15.4a	-114.2a	59.1a	459.4a
	CK	16.1a	-66.6b	35.6b	490.3a	10.8a	-33.5b	27.9b	465.9a
1~100	T1	5.4a	-82.6a	81.6ab		18.9a	-61.1a	30.0a	
	T2	3.2a	-86.7a	73.8ab		17.1a	-51.5a	41.9a	
	T3	5.4a	-93.9a	91.9a		11.0a	-79.2a	40.2a	
	CK	12.2a	-50.4b	62.1b		9.1a	-33.2b	13.6b	
100~200	T1	5.1a	-25.9b	-31.8a		0.6a	-40.7a	11.8a	
	T2	9.1a	-34.2a	-29.0a		5.4b	-45.7a	13.3a	
	T3	7.6a	-36.3a	-20.9a		4.4b	-35.1a	16.7a	
	CK	3.9a	-16.2b	-26.5a		1.7a	-0.3b	14.3a	

注: 不同字母表示在 5% 水平上差异显著。下同。

Note: Different letters meant significant differences at  $P < 0.05$  level.

### 2.2 不同栽培模式春玉米农田土壤含水量垂直动态

春玉米农田土壤含水量垂直动态与施肥、玉米生育期及当年降水量分布密切相关(图 2)。图 2A1~A5 分别是 2012 年春玉米播前、六叶期、吐丝期、乳熟期和收获期 0~200 cm 土层土壤含水量的垂直变化规律。从播前(图 2A1)到六叶期(图 2A2), T1、T2、T3 处理土壤含水量呈“S”型变化, 拐点均出现在 60 cm 和 120 cm 土层深度。吐丝期(图 2A3)和乳熟期(图 2A4)春玉米正值旺盛生长时期, 蒸腾强烈, 水分代谢活跃, 0~40 cm 土层土壤含水量迅速减少, 40~200 cm 土壤含水量随深度增加而增加。玉米完熟期(图 2A5)各处理 0~80 cm 土层受降雨影响波动剧烈, 由于深层土壤水分对浅层水分的补给作用, 各处理 100~200 cm 土层土壤含水量均低于播前。

2013 年试验区降雨量比 2012 年多, 且 7、9 两月降雨很强(图 1)。经过冬季休闲期土壤水分有所恢复, 2013 年六叶期(图 2a2)各处理在 0~60 cm 土壤含水量相对播前(图 2a1)出现不同程度恢复。吐丝期(图 2a3)耗水量大、降雨多, 各土层土壤含水量变化明显。7 月强降水使得乳熟期(图 2a4)各处理土壤含水量迅速上升, 降雨对 T1、T2、T3 处理土壤含水量补给比 CK 更显著, 使 0~200 cm 土壤含水量得到恢复。随着玉米的生长推进, 玉米完熟收获时(图 2a5), T1、T2、T3 处理 80~160 cm 土壤含水

量均低于播前。虽然 T1、T2、T3 处理前、中期耗水量大, 但由于后期蓄纳更多的降水, 各土层含水量恢复快, 而 CK 处理半膜覆盖, 水分在水平方向迁移明显, 逸散强, 因此四个处理 0~200 cm 土层土壤含水量没有显著差异, 不会出现干层。

### 2.3 不同栽培模式春玉米的耗水量、产量和水分利用效率

全膜双垄沟覆盖条件下不同栽培模式对春玉米耗水量、产量和水分利用效率(WUE)(图 3)存在不同影响。与 CK 相比, 两年 T1、T2、T3 处理耗水量分别高出 9.4%、14.8%、15.7% 和 4.7%、3.8%、15.2%, 差异显著( $P < 0.05$ ), T3 处理耗水量最高。2012 年 T1 与 T2、T3 处理存在显著差异; 2013 年 T3 较 T1、T2 处理分别高出 9.8% 和 10.8%, 差异显著。2012 年 T1、T2、T3 处理产量比 CK 分别高 39.4%、41.6%、52.2%, 差异显著, T3 分别比 T1、T2 高 9.2%、4.1%; 2013 年 T1、T2、T3 处理产量分别比 CK 高 27.4%、34.8%、42.4%, 均达到显著水平, T1 和 T2 分别比 T3 低 11.8% 和 5.7%。2012 年试验结果显示, T1、T2、T3 处理春玉米全生育期水分利用效率比 CK 分别高 27.6%、27.7%、32.3%, 差异显著, T3 较 T1、T2 分别高 3.4%、3.3%。2013 年 CK 处理水分利用效率比 T1、T2、T3 分别低 21.7%、29.9%、23.7%, 差异显著; T3 处理开花期揭膜蓄纳更多降水, 供作物代谢吸收, 从而提高水分利用效率。

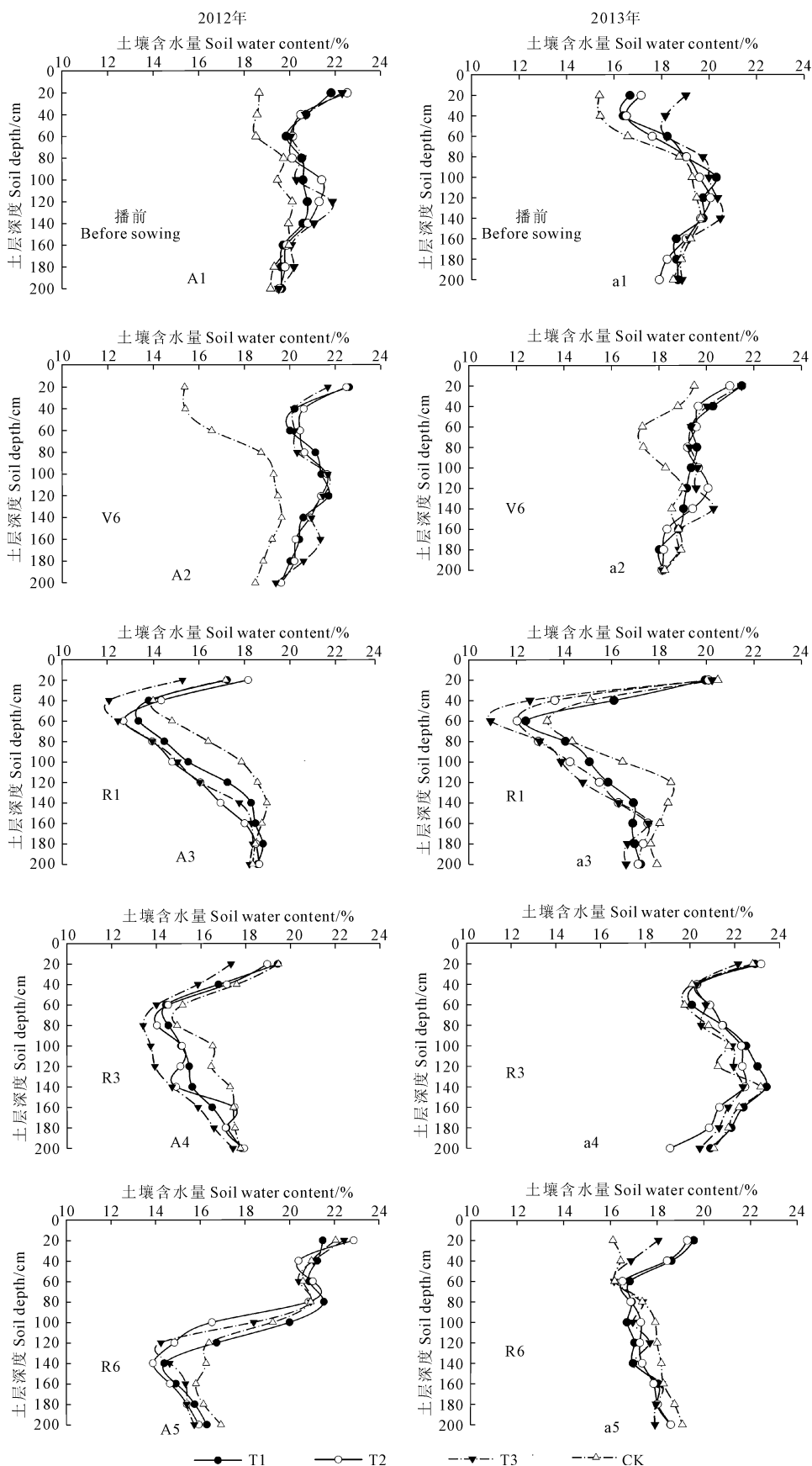


图 2 不同栽培方式旱作春玉米农田 0~200 cm 土壤含水量的垂直变化

Fig. 2 Vertical dynamics of soil water content in 0~200 cm soil layer by different cultivations on rainfed spring maize

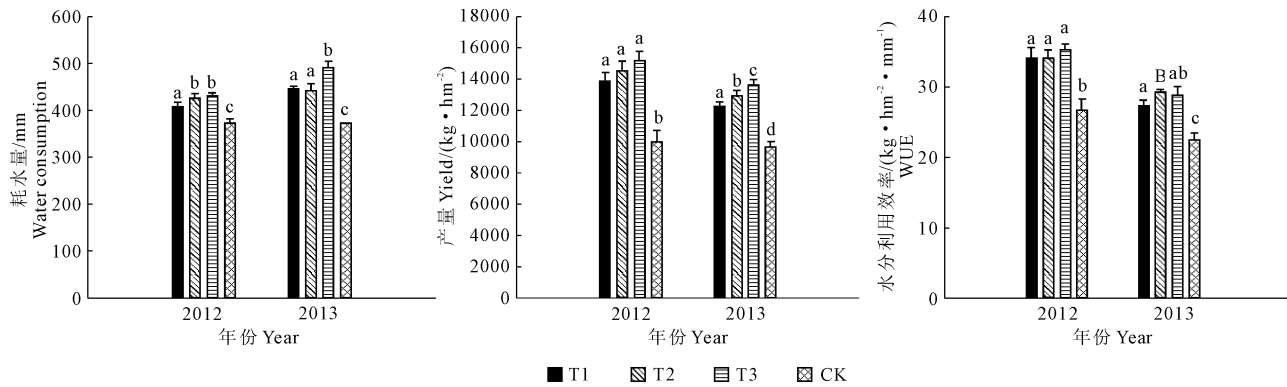


图 3 不同栽培方式旱作春玉米农田耗水量、产量和水分利用效率(平均值 ± 标准误差)

Fig. 3 Water consumption, corn yield and water use efficiency (WUE) by different cultivations on rainfed spring maize (mean ± SE)

### 3 讨论

地膜覆盖显著改变了农田耕作形式和土壤水分运移方式, 阻断了土壤水分的垂直蒸发和乱流, 迫使膜下水分横向迁移, 增大了水分蒸发的阻力, 减少了水分的无效逃逸, 从而达到了蓄水保墒的目的<sup>[19]</sup>。正因为如此, 在玉米需水较少的苗期能贮存更多水分, 供需水旺盛期利用<sup>[20]</sup>。本试验条件下, 吐丝期前(7月14日)降水少, 而玉米快速生长, 耗水量大, 且植株冠层小, 蒸散蒸腾强, 所以0~200 cm 土层土壤贮水量迅速下降, 100~200 cm 土层土壤贮水量较0~100 cm 土层变化相对滞后。V6~R1 时期玉米对0~100 cm 土层土壤水分的消耗以及覆膜的提墒作用, 使得深层100~200 cm 土层土壤水分迅速向上运移, 土壤贮水量急剧减少且主要体现在0~100 cm 浅层土壤。0~200 cm 土层土壤贮水量依次表现为CK > T1 > T2 > T3, 开花期揭膜后玉米进入吐丝和灌浆期, 玉米根系透气性好, 使玉米生长旺盛, 消耗更多水分, 与以往的研究一致<sup>[20-21]</sup>。整个玉米生育期结束, T1、T2、T3 与 CK 处理在0~200 cm 土层土壤贮水量没有显著差异, 说明全膜双垄沟播在春玉米生育期前、中期耗水大, 以供作物吸收利用, 尤其是 T3 揭膜处理为后期雨季的降水腾出更大容库, 从而提高水分利用效率, 达到增产目标。黄土高原旱作春玉米农田土壤剖面水分动态报道颇多, 有研究认为玉米耗水量和耗水深度随产量提高而增加, 高产导致深层土壤水分过耗, 土壤贮水量亏缺, 发生土壤干燥化现象<sup>[1, 22-24]</sup>。深层土壤储水上移被根系吸收利用后, 若来年补给的土壤水分无法弥补上年所消耗的深层储水, 出现在土壤水分最大入渗深度以下土层的土壤干层和土壤退化将无法消除, 将严重影响着作物生长的水环境, 甚至形成永久的土壤干化<sup>[25]</sup>。本试验在渭北旱塬典型雨养农业

区进行, 降水和土壤水是仅有的农田水分资源, 农田作物生长耗水是土壤贮水量下降的主要因素。就两年来看, 玉米收获后各处理土壤含水量都比播前低, 2012 年主要体现在100~160 cm 深层土壤, 2013 年尤其在60~140 cm 土层土壤水分有所亏缺, 但经过后期降水补给和初春水分恢复, 不会出现干层, 这与研究土壤水分过耗出现干燥化现象<sup>[22-24, 26]</sup> 有不同之处, 这可能是覆盖和施肥方式不同所致的土壤水分运移、水肥协同效应、作物根系分布及其吸水特性差异所致, 需要进一步研究。旱地农业措施的中心是充分利用自然降水, 而有效利用土壤深层水分是其途径之一<sup>[27]</sup>。地膜覆盖能够大幅度阻止水分蒸发, 使深层土壤水分向上迁移, 从而有利于旱地作物吸收, 改善作物生长发育水环境, 加快水分在土壤-植物-大气间的运转, 显著提高水分利用效率, 使作物显著增产<sup>[15, 20, 28]</sup>。水分状况、施肥和覆盖方式对玉米的生长发育和耗水规律的影响最终反映在水分利用效率和产量上<sup>[29]</sup>。2012 年试验结果显示, T1、T2、T3 处理春玉米全生育期水分利用效率比 CK 分别高27.6%、27.7%、32.3%, 差异显著( $P < 0.05$ ), T3 最高。2013 年 CK 水分利用效率分别比 T1、T2、T3 低21.7%、29.9%、23.7%。与 CK 相比, 两年 T1、T2、T3 处理耗水量分别高9.4%、14.8%、15.7%、4.7% 和 3.8%、15.2%, 差异显著。2012 年 T1、T2、T3 处理产量比 CK 分别高39.4%、41.6%、52.2%, 差异显著, T3 最高; 2013 年四个处理产量均达到显著水平, T1、T2、T3 分别比 CK 高27.4%、34.8%、42.4%, T1 和 T2 分别比 T3 低11.8% 和 5.7%。覆膜条件下最佳施氮量使得水分利用效率达到最佳状态, 尤其开花期揭膜使玉米根系与外界环境透气性好, 为土壤-水-大气交换营造良好条件, 能更好地利用土壤水和降水, 揭膜后雨水入渗补偿玉米大量耗水引起的水分亏缺, 提高水分利用效率,

玉米灌浆充分,籽粒饱满,从而实现高产。T1 处理虽然产量较高,但是由于  $380 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  氮素的施入给土壤环境带来不利的影响,尤其是长期高氮施肥可增加氮素在土壤中的淋失,不但造成氮肥的浪费,更严重影响土壤—水—大气环境。

## 4 结 论

全膜双垄沟播技术由于蓄水保墒,玉米生长前期土壤水环境较好,后期又能促进深层土壤水分向上迁移,供作物根系吸收利用,能明显地改善玉米耕层土壤水分条件,显著提高 WUE、耗水量和产量。旱作农田全膜双垄沟播在春玉米生育期前、中期耗水大以供作物吸收利用,为后期雨季腾出容库、蓄纳降水,在 0~200 cm 土层不会形成干层。高产高效栽培,特别是开花期揭膜的再高产高效栽培模式,不仅在春玉米生育期没有导致土壤剖面土壤水分显著降低,而且可显著提高籽粒产量和水分利用效率,是该地区值得推广的旱作春玉米栽培模式。

### 参 考 文 献:

- [1] 王学春,李 军,胡 伟,等.黄土高原晋中半干旱区不同肥力水平下连作春玉米产量与土壤干燥化效应模拟[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):1-11.
- [2] 李凤民,王 静,赵松龄.半干旱黄土高原集水高效旱地农业的发展[J].生态学报,1999b,19(2):259-264.
- [3] 刘 钰,Fernando R M,Pereira L S.微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J].水利学报,1999,(6):45-50.
- [4] 肖国举,王 静.黄土高原集水农业研究进展[J].生态学报,2003,23(5):1003-1011.
- [5] Boers T M,Zondervan K,Ben-Asher J. Micro-catchment-water-harvesting (MCWH) for arid zone development[J]. Agricultural Water Management,1986,12:21-39.
- [6] 李 军,王龙昌,孙小文.宁南半干旱偏旱区旱作农田沟垄径流集水蓄墒效果与增产效应研究[J].干旱地区农业研究,1997,15(1):8-13.
- [7] 刘贤赵,康绍忠.降雨入渗和产流问题研究的若干进展及评述[J].水土保持通报,1999,19(2):57-62.
- [8] 王俊鹏,韩清芳,王龙昌.宁南半干旱区农田微集水种植技术效果研究[J].西北农业大学学报,2000,28(4):16-20.
- [9] 李小雁,龚家栋.人工集水面降雨径流观测实验研究[J].水土保持学报,2001,15(1):1-4.
- [10] Guo A H,Li F M,Wei Hong. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring maize[J]. Field Crops Research,1999,63:79-86.
- [11] Ravi V,Lourduraj A C. Comparative performance of plastic mulching on soil moisture content,soil temperature and yield of rain fed cotton[J]. Madras Agric J,1996,83:709-711.
- [12] 胡 芬,陈尚谟.旱地玉米农田地膜覆盖的水分调控效应研究[J].中国农业科学,2000,21(4):14-17.
- [13] 尚勋武,杨祁峰,刘广才.甘肃发展旱作农业的思路和技术体系[J].农业科技与信息,2007,25(S1):194-196.
- [14] 刘广才,杨祁峰,李来祥.旱地玉米全膜双垄沟播技术土壤水分效应研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):18-28.
- [15] 杨祁峰,孙多鑫,熊春蓉.玉米全膜双垄沟播栽培技术[J].中国农技推广,2007,23(8):20-21.
- [16] 柳媛普,李耀辉,王 胜,等.河西走廊中段干旱荒漠区土壤水热状况初步分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(5):204-208.
- [17] Bouyoucos G J. Effect of temperature on the movement of water vapor and capillary moisture in soil[J]. Journal of Agriculture Research,1915,(5):141-172.
- [18] Cary J W. Water flux in moist soil: Thermal versus suction gradients[J]. Soil Science,1964,100:168-175.
- [19] Zhou L M,Li F M,Jin S L. How double ridges and furrows mulched with plastic film affect soil water,soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research,2009,113(1):41-47.
- [20] 王喜庆,李生秀,高亚军.地膜覆盖对旱地春玉米生理生态和产量的影响[J].作物学报,1998,24(3):348-353.
- [21] 张锡梅,徐勇,山仑.不同作物在不同土壤水分条件下的耗水特性[J].生态学报,1989,9(1):97-98.
- [22] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.
- [23] 李玉山.旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J].土壤学报,2001,38(3):353-356.
- [24] 黄明斌,党廷辉,李玉山.黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J].农业工程学报,2002,18(6):50-54.
- [25] 李 军,邵明安,张兴昌,等.黄土高原旱塬区高产玉米田土壤干燥化与产量波动趋势模拟研究[J].中国生态农业学报,2007,15(2):54-58.
- [26] 郭忠升.黄土丘陵半干旱区土壤水资源利用限度[J].应用生态学报,2010,21(12):3029-3035.
- [27] 王红丽,张绪成,宋尚有.半干旱区旱地不同覆盖种植方式玉米田的土壤水分和产量效应[J].植物生态学报,2011,35(8):825-833.
- [28] Liu C A,Zhou L M,Jia Y,et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. European Journal of Agronomy,2009,31:241-249.
- [29] 刘文兆,宋淑亚,王 俊,等.覆盖方式对玉米农田土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响[J].水土保持研究,2012,19(2):212-217.